

令和 6 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02040

研究課題名(和文) 質量標準トレーサビリティ体系のための超高精度・広範囲なシリコン球体計測

研究課題名(英文) Wide diameter range measurement of silicon sphere for mass standard

研究代表者

道畑 正岐 (Michihata, Masaki)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：70588855

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高精度な質量トレーサビリティ体系構築に向け、94 mmから 94 μm の幅広いシリコン球体に対して、同一測定原理でその直径を相対精度 1.0×10^{-6} で測定可能な技術確立を目的とした。そのために、Whispering gallery mode (WGM)共振という光共振現象を用いた手法を提案しており、本研究課題では特に、WGMのモード番号推定と屈折率自律補正法によって、本手法の計測不確かさを改善を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

具体的にな成果については、まず「WGM励起光ファイバー直径計測法の確立によるWGM伝搬定数の推定法」を確立した。従来、1 μm 以下の細い光ファイバーをその場環境で測定する技術はなく、本研究で、これを確立することができた。また、WGMは広く用いられている技術であるものの、そのモード解析および屈折率の補正方法についての報告例は非常に少ない。本研究では、「近接場光の直接検出によるWGMモード番号の推定」「WGMのモード解析による屈折率補正方法の提案とその手法の検証」を行い、今後のWGM研究における特性理解について貢献することが期待される。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research was to establish a technique that can measure the diameter of a wide range of silicon sphere from 94 mm to 94 μm in diameter with a relative accuracy of 1.0×10^{-6} using the unique measurement principle, in order to construct a traceability system of mass. For this purpose, we have proposed a method using optical resonance phenomenon called Whispering gallery mode (WGM) resonance. In this research project, we improved the measurement uncertainty of this method by estimating the mode number of the WGM and by using the refractive index autocorrection method.

研究分野：計測工学

キーワード：Whispering gallery mode テーパ光ファイバー 球 直径

1. 研究開始当初の背景

本研究では、高精度な質量トレーサビリティ体系構築に向け、 $\phi 94 \text{ mm}$ から $\phi 94 \text{ }\mu\text{m}$ の幅広いシリコン球体に対して、同一測定原理でその直径を相対精度 1.0×10^{-6} で測定可能な技術確立を目的とした。そのために、Whispering gallery mode (WGM)共振という光共振現象を用いた手法を提案しており、本研究課題では特に、WGMのモード番号推定と屈折率自律補正法によって、本手法の計測不確かさを改善を行った。

研究代表者は Whispering gallery mode (WGM)共振を用いたマイクロスケール球の直径計測技術を展開している。WGM共振とは、球内部を周回する光の共振状態である。WGM共振を用いた球径計測原理では、WGM共振波長を測定し、その共振波長とモード番号の積により球の円周長が得られ、最終的に直径を決定する。WGM共振は一般的にQ値が高く極めて高分解能な計測が期待できる。例えば直径約 $188 \text{ }\mu\text{m}$ のガラス球に対して、 $\pm 0.010 \text{ nm}$ の繰返し精度を得ている。また、機械的走査が不要であることから、運動誤差がなく、1回の測定が数分と高速計測が可能である。特筆すべき点は、本手法は理論的にはほぼ球体サイズの影響を受けず計測可能であることから、上記のような広範囲の直径を持つシリコン球径計測を同一システムによって実現できる可能性がある。

2. 研究の目的

本手法の課題点として計測の不確かさ保証がある。本計測原理は、概念的に、球体円周の光路長(=物理距離×屈折率)を共振波長とモード番号の積で求める。これまでに、超高精度なWGM共振波長の計測を実現してきた。しかし、球体屈折率とモード番号推定に不確かさが残る。トレーサビリティ体系を整えるためには、不確かさ解析は必須である。

球体屈折率は材料によって 10^4 程度の屈折率は既知であるが、 10^{-6} の相対不確かさ達成のためには、同じく 10^{-6} 以下で屈折率が既知である必要がある。球体に対する汎用的屈折率測定手法は存在せず、高精度計測に向けて、WGM共振を利用したその場での屈折率補正法が必須である。また、モード番号推定も直接的に直径計測結果に影響する。球体が立体であることから伝搬光の強度分布の広がりが生じ、方位角、半径、角度モード3種のモードが存在する。これらのモード番号を特定できて初めて一意に直径を推定できる。これまでにモード番号推定手法を提案しており、推定モード番号を基に求めた球体直径を、他手法による測定直径と比較する間接的方法で、モード番号推定手法の正確性はある程度確かめられた。しかし、他の誤差要因との切り分けが難しく、モード番号推定の不確かさを見積もるためには、提案しているモード番号推定手法の結果を球内に発生している電場光強度分布と関連付けて検証する必要がある。そこで、本研究では、

(1) WGM励起光ファイバー直径計測法の確立によるWGM伝搬定数の推定

(2) 近接場光の直接検出によるWGMモード番号の推定

(3) WGMのモード解析による屈折率補正方法の提案とその手法の検証

を目的とした。以下これらの成果についてまとめる。

3. 研究の方法

(1) WGM励起光ファイバー直径計測法の確立によるWGM伝搬定数の推定

WGMは球の表面にほぼ平行な方向に伝搬する光であるため、効率的に励起するために、特殊な光ファイバーを用いる。具体的には、約 $1 \text{ }\mu\text{m}$ 以下まで細径化した光ファイバーを用い、表面に染み出す近接場光を用いて励起を行う。また、この光ファイバーの伝搬定数と一致するWGMが最も強く励起されることがわかっているため、逆に、励起されるWGMのモード番号を推定するためには、光ファイバー励起光の伝搬定数を知ることが重要となる。そこで、本研究では、光ファイバーの両端から光を入射し、ファイバー内外で定在波を形成し、その定在波ピッチを測定することで伝搬定数の計測を行なった。

(2) 近接場光の直接検出によるWGMモード番号の推定

WGMでは、球体の内部で共振状態の電場が形成されるため、どのようなモードが励起されているのかを知ることは容易ではない。これまでに、測定された複数の共振波長を解析することでモード番号を推定する手法は提案してきている。その推定の確からしさを確認するため、本研究では、表面にわずかに染み出すWGM電場を直接計測することで、モード番号推定の確からしさを検証した。

(3) WGMのモード解析による屈折率補正方法の提案とその手法の検証

WGMでは、球体内での共振によって、球円周の光路長を測定している。光路長であるため、

物体の屈折率が計測精度に大きく影響を及ぼす。しかし、球の屈折率を高精度に測定する手法は存在しないため、WGM 共振スペクトルから屈折率を推定する手法を提案し、その精度評価を行った。

4. 研究成果

(1) WGM 励起光ファイバー直径計測法の確立による WGM 伝搬定数の推定

伝搬定数と定在波ピッチ、およびファイバ径の関係を図 2 に示す。また、実際に近接場プローブを用いて定在波を測定した結果を図 3 に示す。ピッチにして数 10 nm 以下の繰り返し性で計測が可能であり、つまり 0.1 rad/μm の繰り返し性で伝搬定数を測定することができた。この測定によりファイバの直径も測定可能であり、サブマイクロメートルの光ファイバ径を簡易かつその場で計測可能な手法として、その成果は Optics Letters 誌に掲載されている。計測不確かさについては現在解析中ではあり、その成果は Precision Engineering 誌などで公表予定である。この伝搬定数をもとに励起された WGM の伝搬定数を求めることが可能となった。

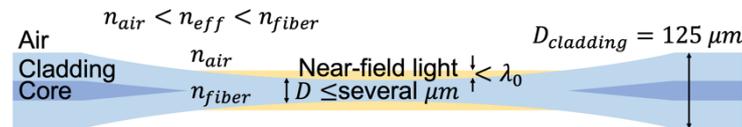


図 1: 細径ファイバーの概要

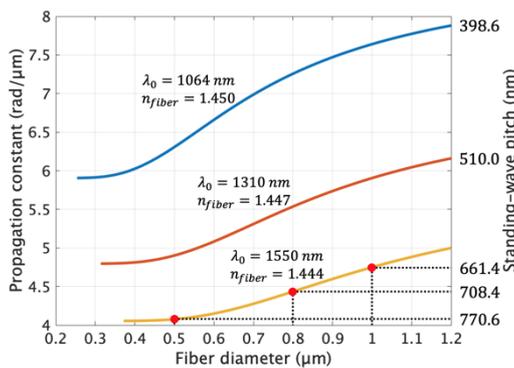


図 2: 伝搬定数と定在波ピッチの関係

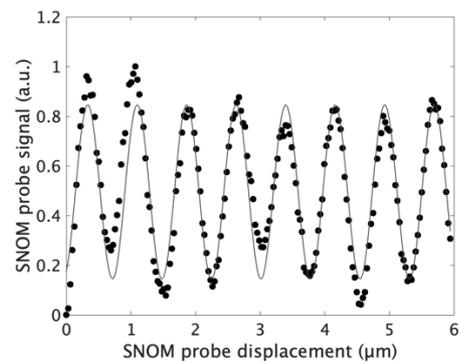


図 3: 定在波ピッチ測定結果

(2) 近接場光の直接検出による WGM モード番号の推定

WGM 共振は非常に感度が高く、周辺環境などの影響を受け、モードが変化してしまう可能性がある。そこで、まず、近接場(SNOM)プローブの形状について検証した。有限要素法(FEM)を用いて、2D モデルで評価を行った。その代表的な結果を図 4 に示す。屈折率条件は表 1 である。プローブを接近させた時の WGM の電場強度の変化を図 5 に示す。SNOM プローブの径が大きくなるほど、また球との距離が近くなる程、強度が減衰していることが確認できる。当然 WGM との相互作用があると、乱れが大きくなるという結果であるが、依然として、モード番号を変化させるほどの影響はないことが確認できた(詳細は省略した)。また、プローブ径を変更することで、信号の S/N にも大きく影響することがわかり、さまざまなプローブ径で解析を行った結果を図 6,7 に示す。その結果、先端径を波長よりもかなり小さくするか、半波長程度がコントラストの高い信号を得られることが示唆された。

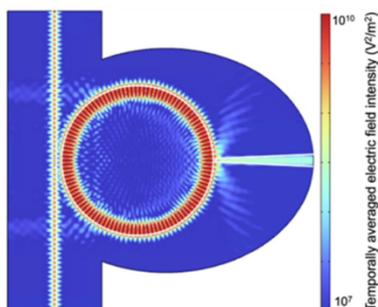
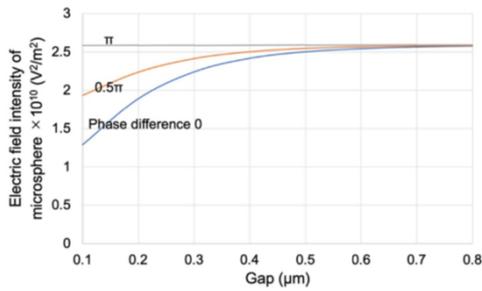


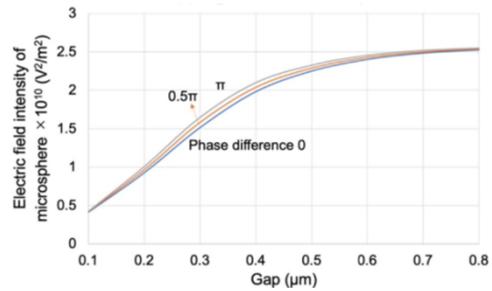
図 4: FEM による WGM 解析の例

表 1: 解析における屈折率条件

Component	Material	Refractive index
Tapered fiber	Quartz glass	1.468
Microsphere	Pure SiO ₂	1.5013-10 ⁻⁵ i
SNOM probe	Quartz glass	1.468



(a) 先端径 100 nm



(b) 先端径 500 nm

図 5 SNOM プローブ測定時の WGM 電場強度

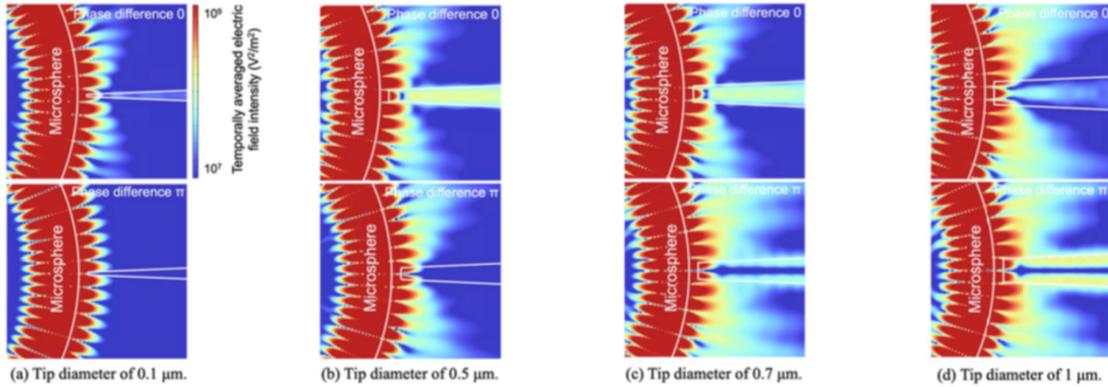


図 6 SNOM プローブ先端径が異なる際の信号取得

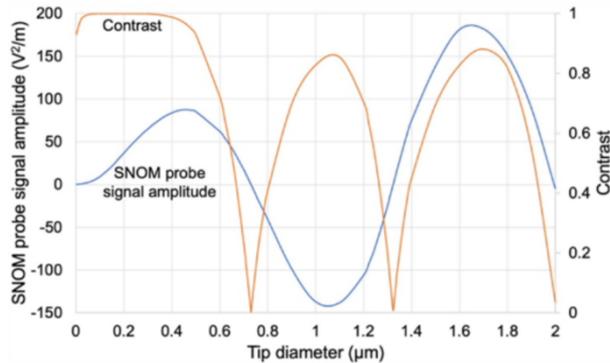


図 6 SNOM プローブ先端径が異なる際の WGM 計測における信号コントラストと振幅

次に WGM の電場を実際に計測した。WGM 計測システムに SNOM プローブを搭載し、球表面を回転走査計測するシステムを構築した (図 7)。図 7 の光ファイバは $1\ \mu\text{m}$ 、球のサイズが $180\ \mu\text{m}$ 程度である。画像処理を用いてプローブ走査の回転中心と球の中心を合わせることで、球に接触することなく表面を走査可能とした。実験ではまず、WGM が励起されていることを確認し、プローブ接近によって共振状態が破壊されないかを確認した。図 8 の青線が WGM の信号であり、オレンジは SNOM プローブ信号であるが、接近させても WGM の共振状態が壊れることはなかった。それを踏まえ、表面を走査したところ、図 9 のような結果が得られた。概ねモード番号推定と近い値が出ることを確認されたものの、SNOM プローブ計測による計測精度が不足しており、今後はより回転運動の精度が高く振動の少ないステージを導入することで、計測精度を高め、モード番号推定法の検証を行っていく。

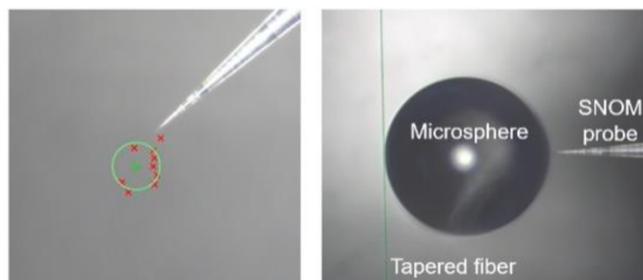


図 7 SNOM プローブを用いた WGM の表面電場計測システム

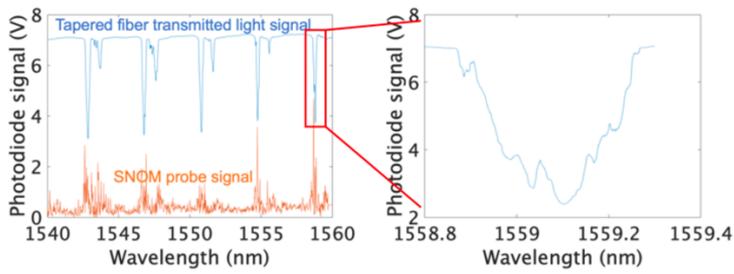


図 8 WGM 共振スペクトル

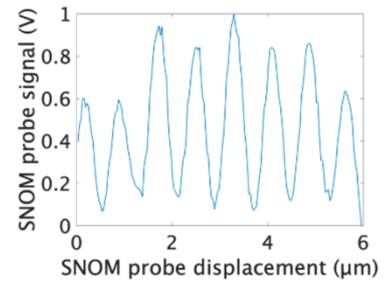
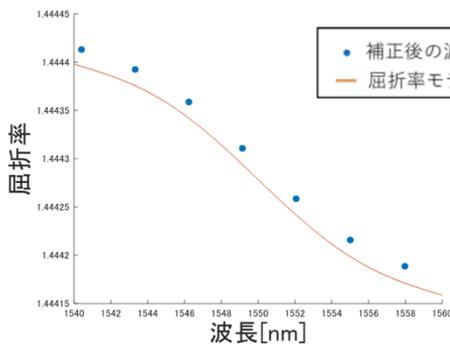


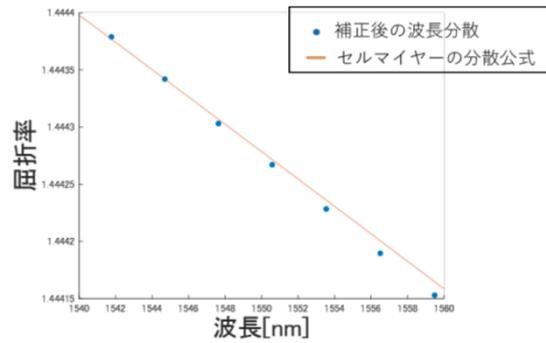
図 9 WGM 表面電場計測結果

(3) WGM のモード解析による屈折率補正方法の提案とその手法の検証

屈折率補正手法の概要については、屈折率分散がない理想的な状況と、屈折率分散がある際の共振スペクトルを理論ベースで比較を行うが、屈折率分散がある場合、当然スペクトルに違いが生じる。その違いを数値的に検証していくことで、屈折率の分散補正をおこなった。具体的には、屈折率の絶対値と、分散（波長による屈折率変化）を別に考え、まずは分散補正をおこなった。その結果を図 10(a)に示す。これは、数値的に手法の有効性を検証したものであるが、True value である屈折率モデルと同様の波長分散性を復元できていることが確認できた。その後絶対値を補正する。具体的測定結果を用いて本手法の有効性を検証した結果が図 10(b)であるが、補正した屈折率をセルマイヤーの式で石英を想定したものと比較した。これを見ると、大きな違いはないものの、 10^{-6} スケールではその違いが明らかに得られていることがわかる。このように、本提案手法の有効性を確認することができた。



(a) 分散補正



(b) 補正結果のセルマイヤーの式との比較

図 10 屈折率補正法の検証

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Liu Yushen, Kadoya Shotaro, Michihata Masaki, Takahashi Satoru	4. 巻 33
2. 論文標題 Measurement properties of electric field intensity distribution of whispering gallery mode with near-field optical probe	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 095501 ~ 095501
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6501/ac74a2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Michihata Masaki, Murakami Sojiro, Kadoya Shotaro, Takahashi Satoru	4. 巻 71
2. 論文標題 Measurement of diameter of sub-micrometer fiber based on analysis of scattered light intensity distribution under standing wave illumination	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 CIRP Annals	6. 最初と最後の頁 421 ~ 424
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cirp.2022.03.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Michihata Masaki, Zheng Zhao, Funaiwa Daiki, Murakami Sojiro, Kadoya Shotaro, Takahashi Satoru	4. 巻 4
2. 論文標題 In-Process Diameter Measurement Technique for Micro-Optical Fiber with Standing Wave Illumination	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanomanufacturing and Metrology	6. 最初と最後の頁 28 ~ 36
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s41871-020-00081-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Souki Fujimura
2. 発表標題 Concept of controlling rotational reference point for dimensional inner shape measurement using dual period grating
3. 学会等名 The 19th International Conference on Precision Engineering (ICPE) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shuhei Goda
2. 発表標題 High precision distance measurement based on external cavity with dual periodic grating
3. 学会等名 the 9th Intl. Conf. of Asian Society for Precision Eng. and Nanotechnology (ASPEN 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 合田周平
2. 発表標題 半導体レーザと外部共振器機構を用いた高精度長さ計測(第4報) -リットマン型外部共振器機構による絶対距離計測-
3. 学会等名 2023年度精密工学会学術講演会春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤村蒼輝
2. 発表標題 絶対距離計測を用いた高精度内径形状計測に関する研究 -二重周期回折格子を用いた基準点位置制御手法の理論的検討-
3. 学会等名 2022年度精密工学会学術講演会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中理香子
2. 発表標題 WGM 共振を利用した微小球の直径計測(第16報) -屈折率自律補正法の提案
3. 学会等名 2022年度精密工学会学術講演会春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 劉 羽辛, 門屋祥太郎, 道畑正岐, 高増 潔, 高橋 哲
2. 発表標題 WGM共振を利用した微小球の直径計測(第13報) -光損失が共振波長に及ぼす影響の検討-
3. 学会等名 2020年度精密工学会学術講演会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤千聖, 門屋祥太郎, 道畑正岐, 高橋 哲
2. 発表標題 ファブリーペロ-共振器を用いたマイクロCMMのプロ-ブ径補正用ゲ-ジの研究(第1報) -二平面間の距離測定-
3. 学会等名 2021年度精密工学会学術講演会春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 合田周平, 門屋祥太郎, 道畑正岐, 高橋 哲
2. 発表標題 半導体レーザと外部共振器機構を用いた高精度長さ計測(第1報) -計測手法提案-
3. 学会等名 2021年度精密工学会学術講演会春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村上宗二郎, 門屋祥太郎, 道畑正岐, 高橋 哲
2. 発表標題 定在波照明を用いたマイクロ光ファイバのインプロセス直径計測(第3報) -サブマイクロ光ファイバの計測のための測定原理の拡張-
3. 学会等名 2021年度精密工学会学術講演会春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 劉 羽辛, 門屋祥太郎, 道畑正岐, 高橋 哲
2. 発表標題 WGM共振を利用した微小級の直径計測(第14報) -WGM光強度分布センシングのためのガラスプローブ先端形状の検討-
3. 学会等名 2021年度精密工学会学術講演会春季大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

個人HP https://sites.google.com/view/masakimichihata/home?authuser=0

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高橋 哲 (Takahashi Satoru) (30283724)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授 (12601)	
研究分担者	門屋 祥太郎 (Kadoya Shotaro) (60880234)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------